



Universitat d'Alacant  
Universidad de Alicante

# **XIII JORNADES DE XARXES D'INVESTIGACIÓ EN DOCÈNCIA UNIVERSITÀRIA**

**Noves estratègies organitzatives i metodològiques en la formació  
universitària per a respondre a la necessitat d'adaptació i canvi**



# **JORNADAS DE REDES DE INVESTIGACIÓN EN DOCENCIA UNIVERSITARIA** **XIII**

**Nuevas estrategias organizativas y metodológicas en la formación  
universitaria para responder a la necesidad de adaptación y cambio**

ISBN: 978-84-606-8636-1

**Coordinadores**

**María Teresa Tortosa Ybáñez**

**José Daniel Álvarez Teruel**

**Neus Pellín Buades**

**© Del texto: los autores**

**© De esta edición:**

**Universidad de Alicante**

**Vicerrectorado de Estudios, Formación y Calidad**

**Instituto de Ciencias de la Educación (ICE)**

**ISBN: 978-84-606-8636-1**

**Revisión y maquetación: Neus Pellín Buades**

**Publicación: Julio 2015**

# **Aplicación de la técnica NAH a la docencia en ingeniería acústica**

P. Poveda Martínez; J. Carbajo San Martín; J de Dios Gonzalez Ruiz; J. Ramis Soriano

*Departamento de Física, Ingeniería de Sistemas y Teoría de la Señal  
Universidad de Alicante*

## **RESUMEN**

La técnica Holografía Acústica de Campo Cercano (NAH), es una técnica conocida en el ámbito de la ingeniería acústica que permite reconstruir el campo sonoro y la velocidad de vibración de una fuente sonora a partir de medidas con micrófonos, en un plano paralelo y cercano a la fuente. La técnica se presenta como una alternativa a las medidas de intensidad estándar. En la presente comunicación se explica la metodología seguida para visualizar el efecto sobre la respuesta en frecuencia de un altavoz coaxial de un cambio en el filtro de cruce y comprobar el efecto de un cambio en las condiciones de contorno del panel que forma un altavoz de modos distribuidos (DML). Esta práctica o lección magistral puede llevarse a cabo en una carrera técnica después de haber recibido un curso de acústica y tener nociones básicas sobre transductores acústicos y procesado de señal. Los resultados facilitan el aprendizaje del alumnado y la asimilación de conceptos que se han impartido en etapas anteriores.

**Palabras clave:** Acústica, aprendizaje, condiciones de contorno, altavoz coaxial, Holografía acústica

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1 Problema/cuestión

No es fácil visualizar los efectos en la respuesta en frecuencia de sistemas radiantes acústicos cuando se llevan a cabo pequeños en la parte eléctrica o bien en la parte mecánica. Por ejemplo, visualizar la frecuencia de corte en un altavoz coaxial de dos vías, el rango de radiación de cada uno de los sistemas en una caja de tres vías o bien la vibración de la placa que constituye un altavoz de modos distribuidos (DML). La técnica NAH es una herramienta adecuada para este objetivo.

### 1.2 Revisión de la literatura

La holografía acústica de campo cercano (NAH) es una técnica que reconstruye el campo sonoro y la velocidad de vibración de un objeto o una fuente sonora a partir de medidas realizadas con una matriz de micrófonos colocados en un plano paralelo y cercano a la fuente sonora.

Las medidas de campo cercano permiten capturar las ondas evanescentes (ondas subsónicas que decaen exponencialmente cuando incrementa la distancia desde la fuente sonora), las cuales contiene una alta resolución de detalles acerca de la fuente [1], NAH implica la medida de la amplitud y la fase de la presión usando el arreglo de micrófonos,

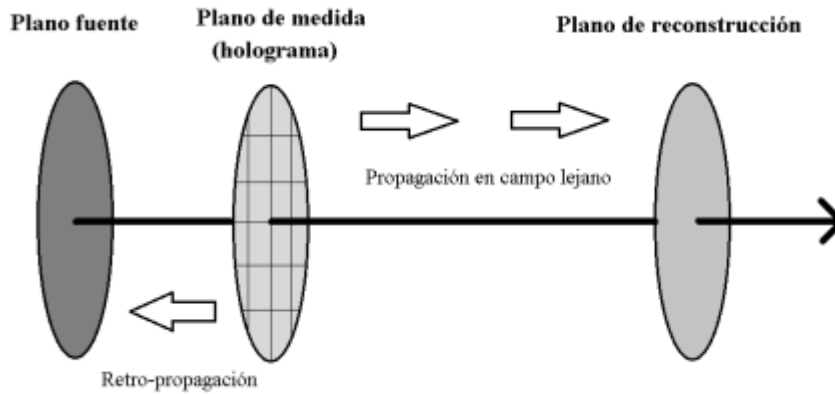
El campo sonoro de una fuente sonora puede descomponerse en un espectro angular, definido en el espacio del número de onda  $k$ , como la superposición de ondas planas viajando en direcciones diferentes.

En el campo cercano de una fuente sonora, el campo sonoro se compone de dos tipos de ondas propagándose, las ondas planas que se propagan hasta el campo lejano, y las ondas evanescentes que decaen exponencialmente con la distancia y que aportan información importante sobre la fuente. El objetivo de la holografía acústica de campo cercano es de capturar esas ondas evanescentes antes de que caigan.

Las medidas del campo sonoro en el plano de la holografía permitirá reconstruir el campo de presión complejo en campo lejano (se habla de propagación) y también en la superficie de la fuente sonora (se habla de retro-propagación). Además se puede obtener el campo del vector intensidad del sonido, la velocidad de propagación de la superficie y otros parámetros característicos de una fuente vibrando [2]. La Figura 1 ilustra cómo es la

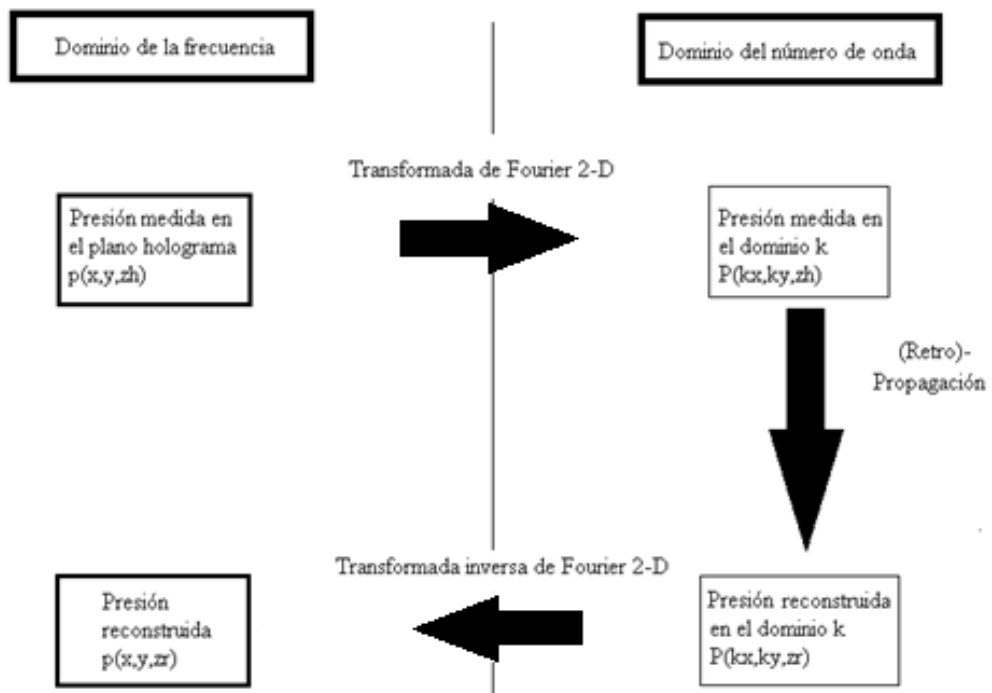
reconstrucción del campo sonoro en el plano de la fuente y en un plano lejano a partir del plano de medida (holograma).

Figura 1. Fases en la reconstrucción del campo sonoro en el plano de la fuente y en un plano lejano a partir del plano de medida (holograma)



La reconstrucción del campo sonoro tridimensional se obtiene considerando que el campo de medida obedece a la ecuación de onda lineal y usando como propagar la función de Green. El campo de presión acústica se calcula usando una transformada de Fourier en dos dimensiones y aplicando la teoría de propagación de ondas en el dominio del número de onda  $k$ . La Figura 2 expresa el proceso de reconstrucción del campo sonoro a partir de NAH.

Figura 2. El campo de presión acústica se calcula usando una transformada de Fourier en dos dimensiones y aplicando la teoría de propagación de ondas en el dominio del número de onda  $k$ .



A partir del teorema de Green, se puede derivar una integral que describa la presión acústica en cualquier lugar del espacio medio entre la fuente y un plano de medida.

La presión compleja en cualquier punto del espacio  $(x,y,z)$  puede expresarse como una función de la presión compleja  $\bar{p}_s$  en el plano de la fuente  $z_s$

$$\bar{p}(x,y,z) = \iint_{-\infty}^{\infty} \bar{p}_s(x',y',z_s) \times \bar{G}'(x-x',y-y',z-z_s) dx' dy' \quad (1)$$

Siendo  $\bar{G}'$  la función de Green modificada.

Aplicando la ecuación anterior al plano de holografía  $z_h$ , se obtiene:

$$\bar{p}_h(x,y,z_h) = \iint_{-\infty}^{\infty} \bar{p}_s(x',y',z_s) \times \bar{G}'(x-x',y-y',z_h-z_s) dx' dy' \quad (2)$$

Como  $z_h-z_s$  es una constante, la ecuación anterior (2.37) describe una convolución en dos dimensiones entre la presión compleja en el plano  $z_s$  y la función de Green.

Aplicando la transformada de Fourier en dos dimensiones, esta convolución se convierte en un producto simple en el espacio del número de onda.

$$\bar{P}_h(kx,ky,z_h) = \bar{P}_s(kx,ky,z_s) \cdot \bar{G}'(kx,ky,z_h-z_s) \quad (3)$$

Tomando la transformada de Fourier en ambas caras de la ecuación 2.36 se obtiene la distribución de presión compleja en un plano arbitrario  $z$  en el espacio de número de onda  $k$ .

$$\bar{P}(kx,ky,z) = \bar{P}_s(kx,ky,z_s) \cdot \bar{G}'(kx,ky,z-z_s) \quad (4)$$

Despejando de la ecuación 2.37 se obtiene:

$$\bar{P}(kx,ky,z) = \bar{P}_h(kx,ky,z_h) \cdot \bar{G}'(kx,ky,d) \quad (5)$$

Siendo  $d = z - z_h$  la distancia entre el plano reconstruido y el plano del holograma.

Dependiendo de si se quiere propagar o retro-propagar, la distancia  $d$  puede ser positiva o negativa y la función de Green se define entonces como propagador (o retro-propagador) y se define como:

Propagación ( $d > 0$ )

$$\bar{G}'(kx,ky,d) = \begin{cases} e^{id\sqrt{k^2-k_x^2-k_y^2}} & \text{para } k_x^2 + k_y^2 \leq k^2 \text{ ondas planas} \\ e^{-d\sqrt{k_x^2+k_y^2-k^2}} & \text{para } k_x^2 + k_y^2 > k^2 \text{ ondas evanescentes} \end{cases} \quad (6)$$

Retro-propagación ( $d < 0$ )

$$\overline{G}^{-1}(kx, ky, d) = \begin{cases} e^{i|d|\sqrt{k^2 - k_x^2 - k_y^2}} & \text{para } k_x^2 + k_y^2 \leq k^2 \text{ ondas planas} \\ e^{+|d|\sqrt{k_x^2 + k_y^2 - k^2}} & \text{para } k_x^2 + k_y^2 > k^2 \text{ ondas evanescentes} \end{cases} \quad (7)$$

El círculo  $k_x^2 + k_y^2 = k^2$  se llama círculo de radiación, para los puntos  $(kx, ky)$  dentro de él,  $\overline{G}$  representa el cambio de fase en la dirección z de las ondas planas, mientras que para los puntos  $(kx, ky)$  fuera del círculo,  $\overline{G}$  representa el decaimiento exponencial de las ondas evanescentes.

A partir de la presión en el espacio k,  $\overline{P}(kx, ky, z)$ , se puede determinar el vector velocidad aplicando la ecuación de Euler.

Para campos acústicos armónicos en el tiempo, la ecuación de Euler se define como:

$$\vec{v} = \frac{i}{\omega\rho} \vec{\nabla} p \quad (8)$$

Aplicando la transformada de Fourier inversa a la ecuación anterior se obtiene:

$$\vec{v}(k_x, k_y, z) = \frac{1}{\omega\rho} (k_x e_x + k_y e_y - i e_z \frac{\delta}{\delta z}) \overline{P}(kx, ky, d) \quad (9)$$

Las tres componentes de la velocidad de partícula compleja vienen dadas por:

$$\begin{aligned} \vec{v}_x(x, y, z) &= \frac{1}{4\pi^2 \omega \rho_0} \iint_{-\infty}^{+\infty} k_x \overline{P}_h(kx, ky, z_h) e^{-ik_z(z-z_h)} e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} dk_x dk_y \\ \vec{v}_y(x, y, z) &= \frac{1}{4\pi^2 \omega \rho_0} \iint_{-\infty}^{+\infty} k_y \overline{P}_h(kx, ky, z_h) e^{-ik_z(z-z_h)} e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} dk_x dk_y \\ \vec{v}_z(x, y, z) &= \frac{1}{4\pi^2 \omega \rho_0} \iint_{-\infty}^{+\infty} k_z \overline{P}_h(kx, ky, z_h) e^{-ik_z(z-z_h)} e^{-ik_x x} e^{-ik_y y} dk_x dk_y \end{aligned} \quad (10)$$

La transformada inversa de Fourier de la ecuación anterior proporciona el vector velocidad reconstruido.

### 1.3 Propósito

En la presente comunicación se explica la metodología seguida para visualizar el efecto sobre la respuesta en frecuencia de un altavoz coaxial de un cambio en el filtro de cruce y comprobar el efecto de un cambio en las condiciones de contorno del panel que forma un



altavoz de modos distribuidos (DML). También se muestran las posibilidades de aplicar la técnica para el caso de un altavoz coaxial y de un recinto Bass Reflex de tres vías.

## 2. METODOLOGÍA

Esta etapa del proceso de investigación conlleva el diseño de los procedimientos y métodos utilizados para estudiar el problema. Podemos subdividir la metodología en:

### 2.1. Descripción del contexto y de los participantes

Esta práctica o lección magistral puede llevarse a cabo en una carrera técnica después de haber recibido un curso de acústica y tener nociones básicas sobre transductores acústicos y procesamiento de señal.

### 2.2. Materiales

Son necesarios los sistemas radiantes objeto de estudio. Se presenta en la figura un altavoz DML con sus actuadores por la parte de atrás.

Figura 3. Altavoz DML por la parte delantera y por la parte trasera (con sus dos actuadores)



### 2.3. Instrumentación

El detalle más particular de la instrumentación utilizado son los micrófonos de  $\frac{1}{4}$  de pulgada que se utilizan para los registros. La distancia entre micrófonos influye en el rango frecuencial válido para el análisis.



Figura 4. Micrófonos de ¼ de pulgada utilizados para el registro de NAH



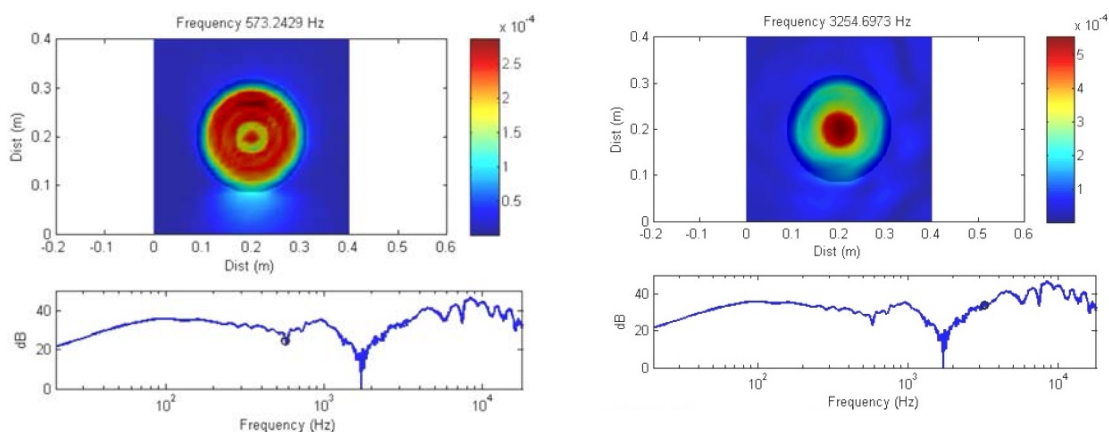
## 2.4. Procedimientos

Esta fuera de los objetivos del presente trabajo realizar una descripción exhaustiva del procedimiento que puede ser consultado en [2].

## 3. RESULTADOS

Se muestran a continuación, en las figuras resultados significativos del proceso. En primer lugar, en la figura 5 se presenta la distribución relativa de velocidades sobre la superficie del diafragma del altavoz coaxial cuando está activo el altavoz de graves (baja frecuencia) y el de agudos (alta frecuencia), Al mismo tiempo se visualiza la respuesta en frecuencia completa del sistema cuando los dos actuadores entran en funcionamiento

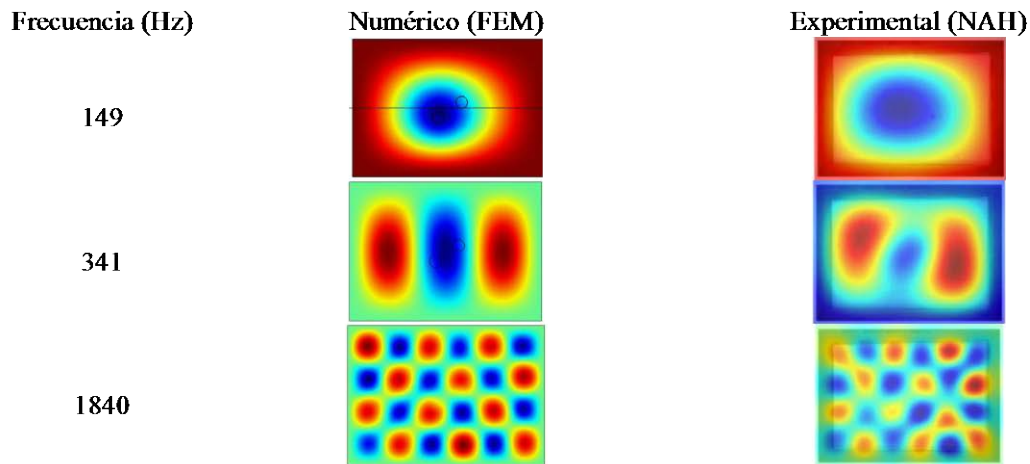
Figura 5. Distribución relativa de velocidades sobre la superficie del diafragma del altavoz coaxial cuando está activo el altavoz de graves (izquierda) y el de agudos (derecha)



En la figura 6 se comparan las distribuciones de velocidad en la superficie del DML cuando está excitada por los dos actuadores obtenida numéricamente (mediante un análisis en

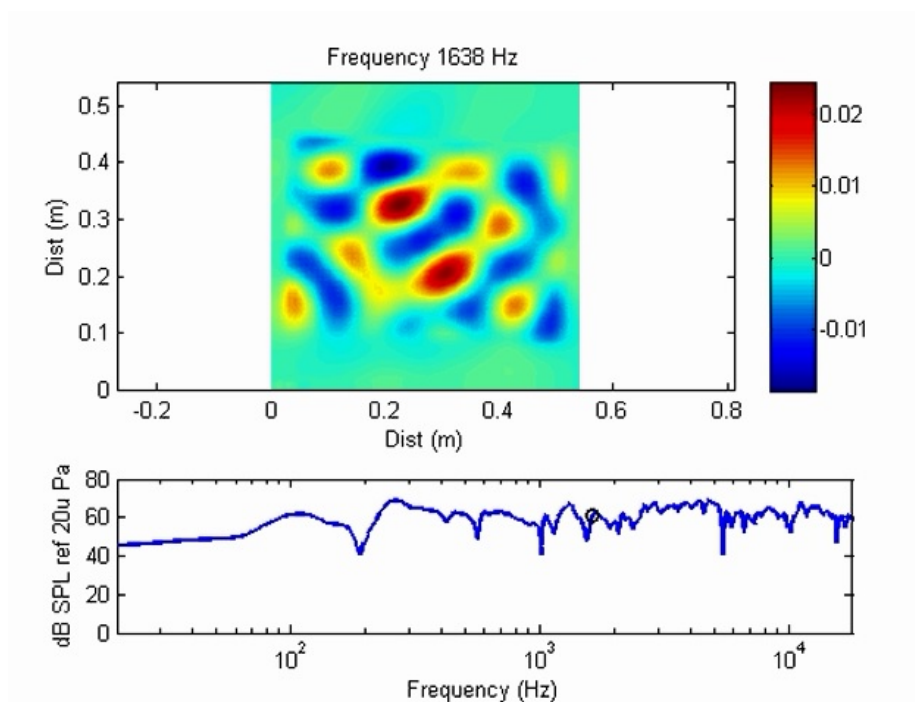
Elementos Finitos) comparándolas con las obtenidas experimentalmente para distintas frecuencia.

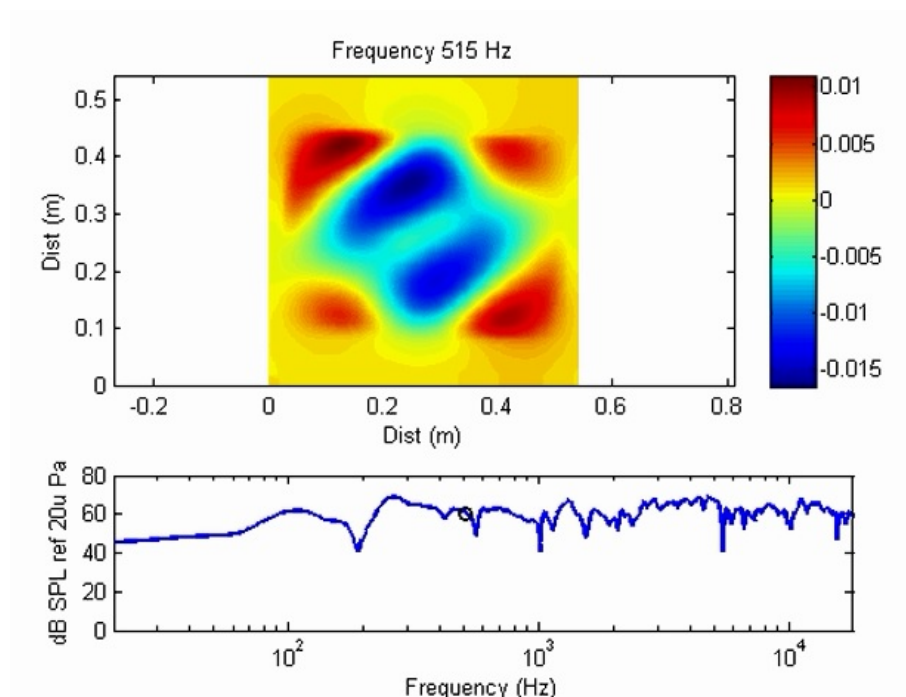
Figura 6. Modos de vibración obtenidos numéricamente comparándolos con los obtenidos experimentalmente



En la figura 7 se presenta la distribución relativa de velocidades sobre la superficie del panel para dos frecuencias, al mismo tiempo que se visualiza la respuesta en frecuencia completa del sistema cuando los dos actuadores entran en funcionamiento.

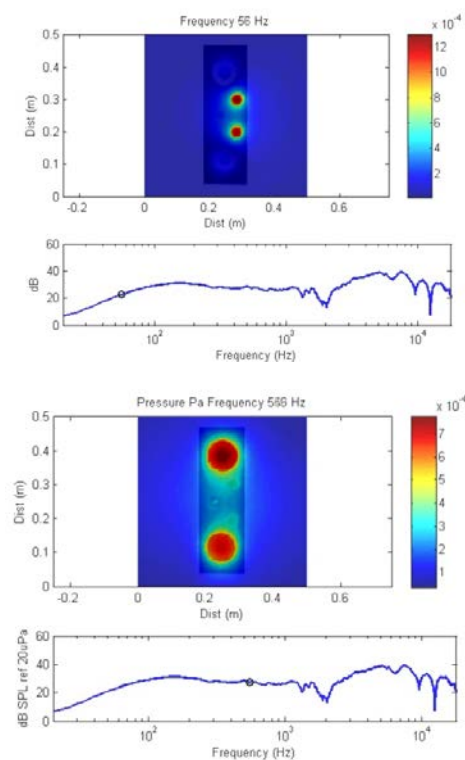
Figura 7. distribución relativa de velocidades sobre la superficie del panel para dos frecuencias (1638 y 515 Hz)

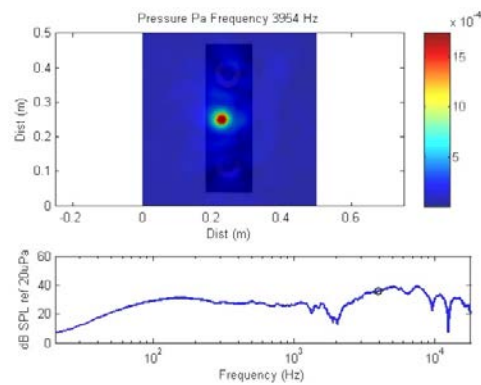




Por último, en la figura 8 se presentan los resultados del procesado que permiten visualizar la radiación de los tubos Bass Reflex, del altavoz de graves y del de agudos en un recinto de dos vías Bass Reflex.

Figura 8. Resultados del procesado que permiten visualizar la radiación de los tubos Bass Reflex, del altavoz de graves y del de agudos en un recinto de dos vías Bass Reflex.





#### 4. CONCLUSIONES

En la presente comunicación se ha mostrado la metodología NAH aplicada a la visualización del efecto sobre la respuesta en frecuencia de un altavoz coaxial de un cambio en el filtro de cruce, así como la comprobación del efecto de un cambio en las condiciones de contorno del panel que forma un altavoz de modos distribuidos (DML). Esta experiencia o lección magistral puede llevarse a cabo en una carrera técnica después de haber recibido un curso de acústica y tener nociones básicas sobre transductores acústicos y procesamiento de señal. Los resultados facilitan el aprendizaje del alumnado y la asimilación de conceptos que se han impartido en etapas anteriores.

#### 5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. G. Williams, Fourier Acoustics. Sound and Near-field Acoustical Holography, London: Academic Press, 1999.
- [2] E. M. Escuder Silla, Estudio del comportamiento Acústico de Estructuras Multicapa mediante NAH, Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2005.